

УДК 620.179

Г. Ф. Ловшенко, канд. техн. наук, доц., А. С. Федосенко, А. М. Старовойтов

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НАПЫЛЕНИИ В РЕЖИМАХ С ОБЫЧНОЙ И ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ПОДАЧЕЙ ПЛОХОТЕКУЧЕГО КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПОРОШКА

На основании проведенных экспериментальных исследований установлены скорости нарастания плазменных покрытий из труднотекучего композиционного керамического порошка, подаваемого в обычном непрерывном и пульсирующем режимах в дуговую воздушно-пропановую плазму на срез сопла плазмотрона.

### *Введение*

Перспективными материалами для получения плазменных покрытий являются композиционные порошки, полученные методами конгломерирования и диффузионного механического легирования [1], поскольку из них можно напылять покрытия с хорошими физико-механическими свойствами, их стоимость ниже, они проще в изготовлении, чем, например, порошки, получаемые обычными физико-химическими методами или распылением расплава в инертную атмосферу.

Существенным недостатком таких порошков является низкая текучесть, вызванная несферической формой частиц, из которых они состоят, и их неоднородным гранулометрическим составом. При равномерной подаче таких порошков из питателя появляется ряд проблем, связанных со слеживаемостью порошка, его зависанием в бункере питателя (сводовообразованием), налипанием на стенки бункера, а также других, приводящих к нестабильности процесса напыления и, в конечном итоге, к ухудшению качества покрытий или даже к невозможности их получения.

Кроме этого, плохотекучие порошки, подающиеся из питателя в плазмотрон, налипают на стенки порошкового тракта и застревают в трубках, особенно в местах их изгибов и уменьшений диаметра каналов. Это ведет к неравномерности подачи или к ее прекращению, что негативно сказывается на процессе напыления.

Однако и равномерная подача порошков с хорошей текучестью создает проблемы при напылении покрытий, связанные с невысокой эффективностью нагрева напыляемого материала и с недостаточной загрузкой им плазмы. Например, по данным [2] количество энергии, затраченной на нагрев порошка в воздушно-пропановой плазме составляет всего 8 % от всей энергии, выделяющейся в плазмотроне, а по данным [3] увеличение количества трубок для подвода порошка с одной до трех (при одинаковом его расходе) приводит к увеличению коэффициента использования энергии плазменной струи до 25...27 %. Недозагрузка плазмы приводит к значительному увеличению времени напыления покрытий, работы оборудования и расходу электрической энергии.

К плохотекучим относятся порошковые материалы с диаметром частиц менее 10 микрон, а также имеющие форму частиц, значительно отличающуюся от сферической (оскольчатую, пластинчатую, игольчатую и др.). В литературных источниках текучесть порошковых материалов определяется по углу естественного откоса у основания насыпанной из воронки конусообразной горки порошка. Считается, что чем угол больше, тем хуже текучесть [4, 5].

Следует отметить, что существенным преимуществом применения труднотекучих порошков по сравнению с

порошками со сферическими частицами является большая удельная поверхность частиц, позволяющая эффективней прогреваться в высокотемпературном газовом потоке за то весьма короткое время (порядка  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  с), которое они в нем находятся при напылении покрытий [6].

Использующиеся в настоящее время для газотермического напыления порошковые питатели (за исключением питателей, предназначенных для детонационного напыления) должны обеспечивать равномерную подачу порошка, поскольку считается, что это необходимое условие для получения покрытий со стабильными физико-механическими свойствами [7]. Такие питатели отличаются сложностью конструкции, высокой стоимостью и, как показывает практика, могут подавать только порошки с хорошей и удовлетворительной текучестью (с углом естественного откоса до 35 и до 45 град соответственно). Для подачи труднотекучих материалов (угол естественного откоса которых больше 45 град) они непригодны и, кроме этого, производятся за пределами Республики Беларусь.

Современные способы улучшения текучести порошка, такие как сфероидизация его частиц, путем оплавления их в потоке высокотемпературного газового потока, или отсеивание более крупных частиц одинаковой фракции от мелких, требуют наличия специального оборудования и дополнительных энерго- и трудозатрат. Они приводят к значительному увеличению стоимости порошка и, соответственно, удорожанию покрытий.

Ранее были разработаны два способа равномерной подачи плохотекучих керамических порошковых материалов.

По первому способу из порошка формируются и спекаются тонкие стержни диаметром 3...4,5 мм, которые затем подаются в напыляющее устройство и распыляются потоком высокотемпературного газа. В настоящее время этот способ практически не применяется из-за различных, свойственных ему, недостатков [8].

По второму способу порошком заполняют тонкую трубку из органического

материала, получая так называемый гибкий шнур [8]. Шнур наматывается в бухту, и из нее с требуемой скоростью подается в напыляющее устройство. При напылении органический материал шнура полностью выгорает. Чаще всего гибкие шнуры применяются в газопламенных технологиях. Для изготовления гибких шнуров необходимо наличие специального оборудования и технологии, которые в настоящее время отсутствуют в Республике Беларусь. Кроме этого, выпускающиеся гибкие шнуры не подходят для плазменного напыления, т. к. предназначены для использования исключительно в технологиях газопламенного напыления и наплавки.

Для решения проблемы плазменного напыления покрытий из плохотекучих порошковых материалов была предложена технология их подачи в дуговую плазму последовательными порциями при помощи пульсаций транспортирующего воздуха [9].

Сущность способа плазменного напыления с подачей порошка в пульсирующем режиме такова: для разрушения зависшего в бункере питателя порошка системой клапанов создаются перепады давления транспортирующего воздуха в верхней и нижней части бункера (под зависшим порошком и над ним). Это вызывает циркуляцию воздуха, приводящую к разрыхлению и обрушению порошка. Порция разрыхленного порошка вместе с потоком транспортирующего воздуха подается на срез плазмотрона. Таким образом, пульсации порошка при его подаче образуются вследствие возникновения циклических перепадов давления воздуха в порошковом питателе.

Было спроектировано и изготовлено специальное оборудование, предназначенное для создания перепадов давления транспортирующего воздуха с различной частотой и длительностью.

На рис. 1 схематически изображен принцип действия питателя для подачи порошка в пульсирующем режиме.

Применение пульсирующей подачи порошкового материала вносит в технологию напыления некоторые изменения по сравнению с обычным способом. В частности, при напылении необходимо учитывать влияние степени загрузки плазменного по-

тока на длину его высокотемпературного участка. На фотографиях (рис. 2) показаны изменения, происходящие с запыленным потоком дуговой плазмы при пульсирующей подаче порошкового материала.

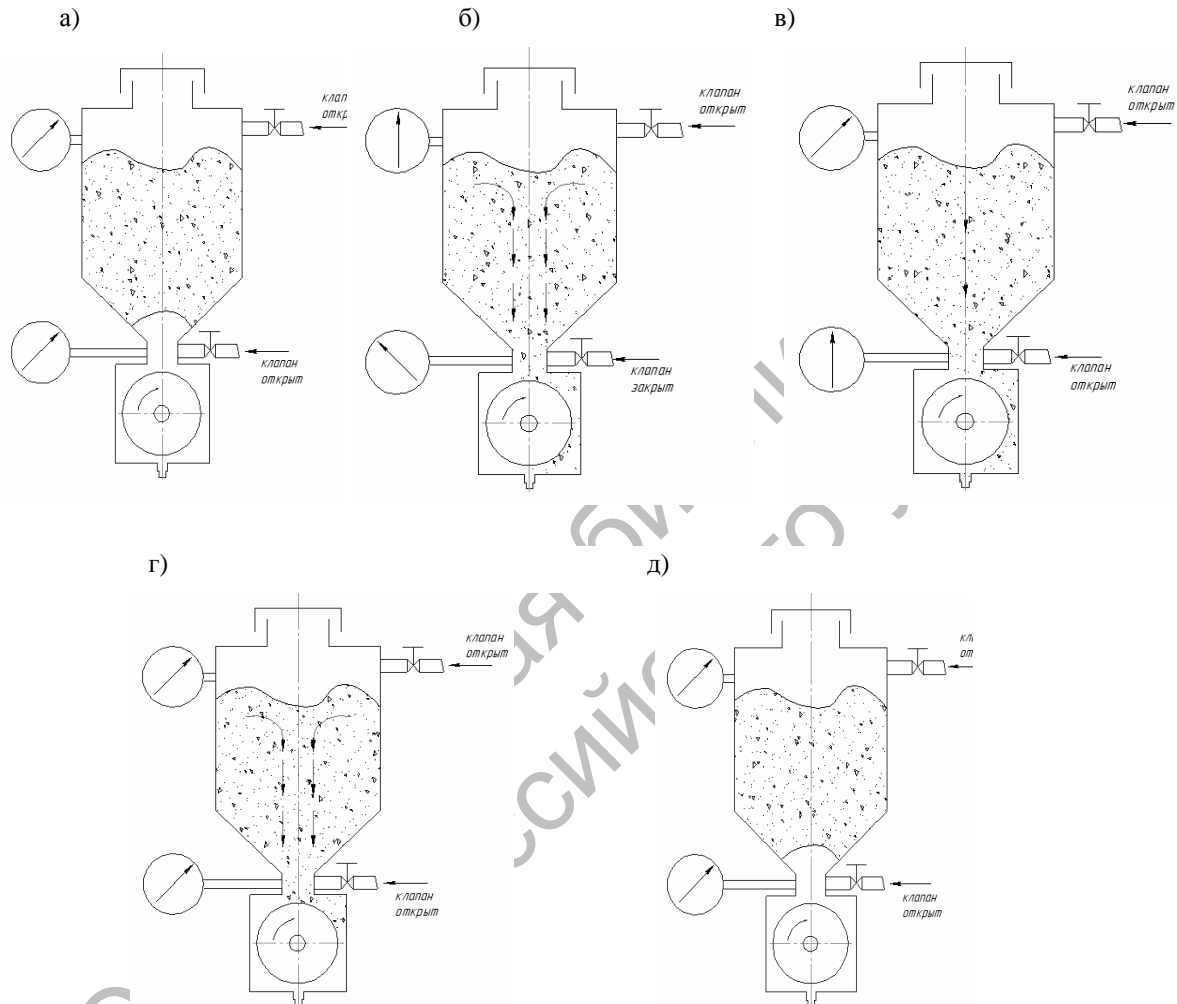


Рис. 1. Работа питателя в режиме с пульсирующей подачей порошка: а – зависание порошка в бункере (начало цикла пульсации); б – движение воздуха в бункере питателя; в – движение воздуха вместе с порошком, порошок зависает (конец цикла пульсации); д – начало нового цикла

Проведенные в [10] исследования чистоты поверхности шлифованных плазменных покрытий, напыленных из различных порошков, показали, что покрытия из композиционного керамического порошка, состоящего из окиси алюминия с добавкой 13 % двуокиси титана, напыленные в режиме с пульсирующей подачей практически не отличаются от покрытий из им-

портного порошка «Metco 131VF», напыленных в обычном режиме.

**Материалы и оборудование.**

**Методика проведения исследований**

Для экспериментов использовался композиционный керамический порошковый материал, полученный с использованием методов диффузионного леги-

рования в механическом атриторе [11], основными компонентами которого являются окись алюминия ( $Al_2O_3$ ) и двуокись титана ( $TiO_2$ ). Размер фракций частиц – 20 микрон и 2 микрона соответственно.

На фотографии (рис. 3), сделанной на

микроскопе «Neofot», показаны частицы используемого порошкового материала. Видна несферическая (оскольчатая) форма частиц порошка и их различный гранулометрический состав.

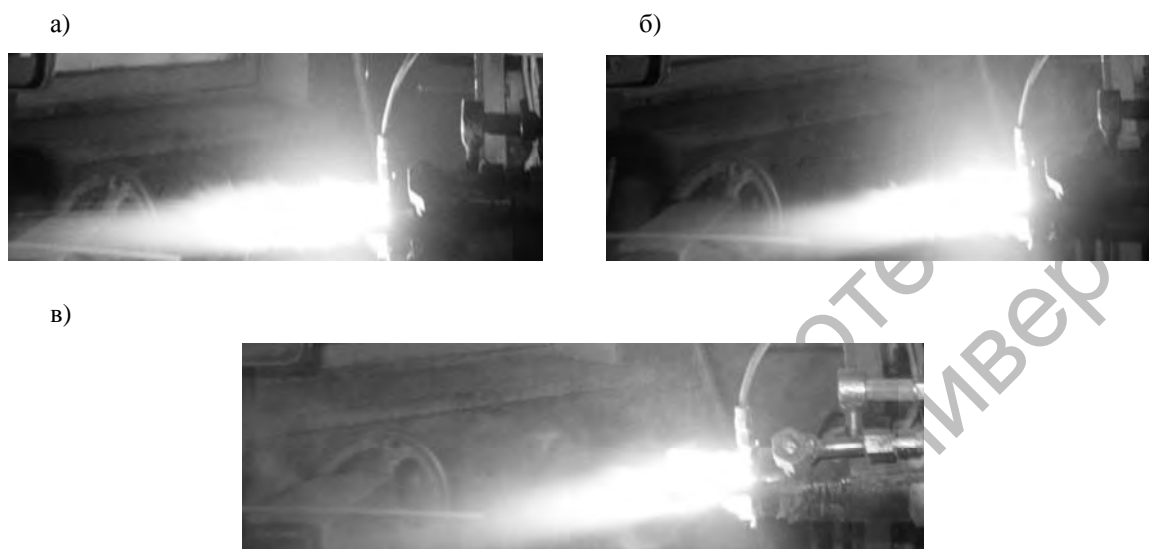


Рис. 2. Изменение длины запыленного потока дуговой плазмы при подаче порошка в пульсирующем режиме: а – начало подачи порошка в дуговую плазму; б – отклонение плазмы под действием загружаемого порошка; в – сокращение высокотемпературной части запыленной плазмы во время максимальной подачи порошка

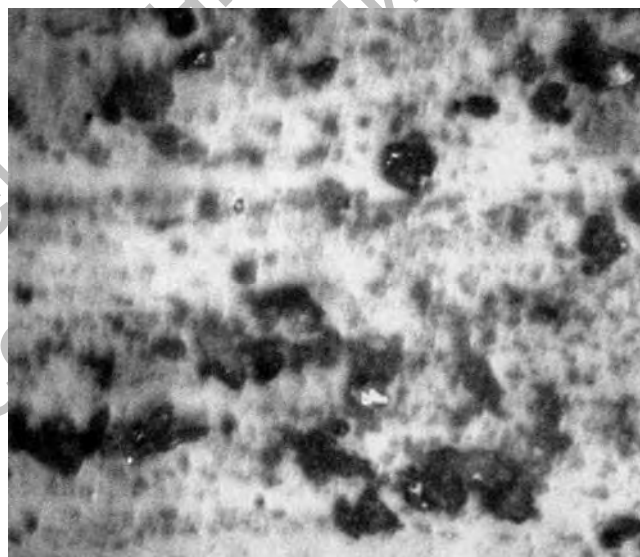


Рис. 3. Частицы композиционного порошка для напыления

Текущность используемого порошка определялась по углу естественного откоса. На фотографии (рис. 4) показано, что

этот угол составляет  $47^\circ$ . Это значит, что порошковый материал обладает неудовлетворительной текущостью.

Однако при нагреве выше 100...150 °С текучесть порошка резко возрастает, и в нагретом состоянии он растекается по поверхности подобно жидкости (рис. 5).

Плохая текучесть порошка в холодном состоянии и хорошая в нагретом по-

зволяют использовать различные способы для его подачи при напылении (пульсирующий и непрерывный соответственно) и тем самым оценить и сравнить их производительность.

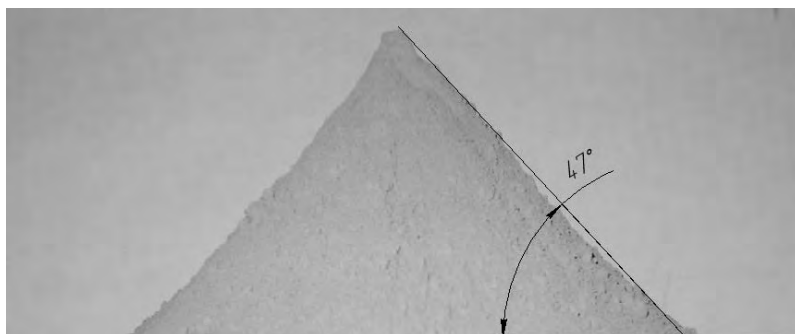


Рис. 4. Угол естественного откоса композиционного порошкового материала

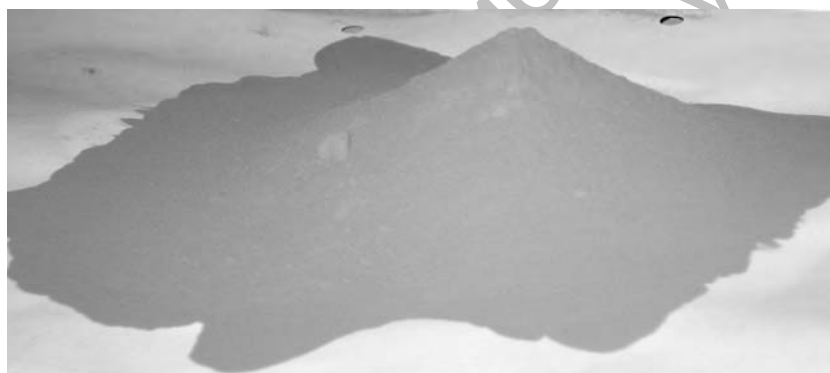


Рис. 5. Растекание нагретого порошка по поверхности

В эксперименте использовались два специально изготовленных питателя роторного типа [3] (рис. 6), один из которых оснащен устройством для создания циклических перепадов давления в бункере и подачи порошка в пульсирующем режиме (на фотографии слева). Второй питатель предназначен для равномерной подачи нагретого композиционного порошка (на фотографии справа). На его бункере смонтирован нагревательный элемент для поддержания порошка в нагретом состоянии с постоянной температурой.

Применяющиеся питатели близки по конструкции с питателями, использую-

щимися в установке для плазменного напыления фирмы «Метко».

Напыление покрытий производилось с использованием специально спроектированного и изготовленного дугового плазмотрона, работающего на воздушно-пропановой плазмообразующей смеси (рис. 7). Порошок подавался на срез его сопла.

В конструкции плазмотрона применены некоторые технические решения, повышающие стабильность и безопасность его работы: в нем отсутствуют межэлектродные вставки, воздух и пропан подаются в дуговую камеру раз-

дельно, обеспечена возможность его работы от различных источников питания и другие.

Плазмотрон работал от источника питания для воздушно-плазменной резки марки АПР-404.

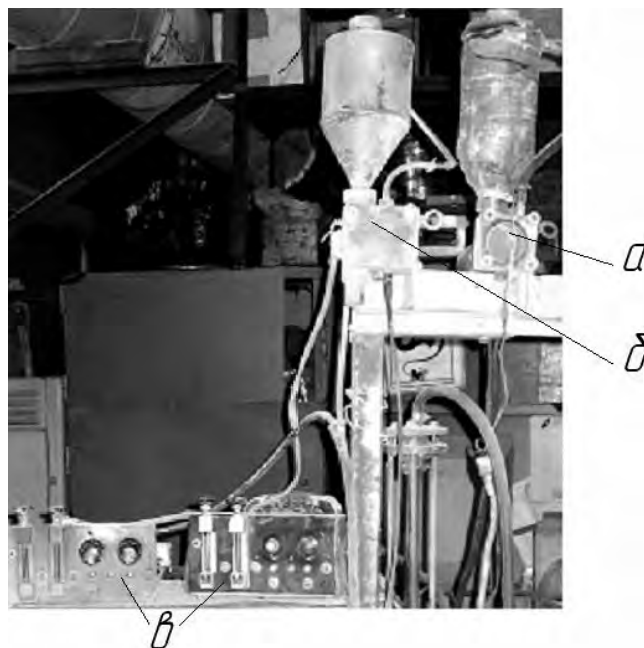


Рис. 6. Порошковые питатели с пультами управления: а – питатель с нагревательным элементом; б – питатель для пульсирующей подачи порошка; в – пульта управления питателями

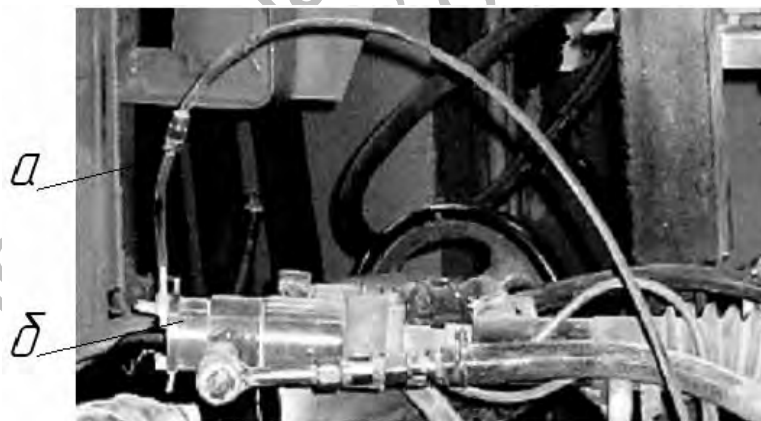


Рис. 7. Дуговой плазмотрон (б) с трубкой для подачи порошка (а)

Покрyтия напылялись на вращающуюся поверхность цилиндрических деталей (рис. 8).

Толщина покрyтия измерялась 29 раз в различных точках электронным толщиномером марки МТЦ-2М. Затем совокупность полученных данных проверялась на нормальность распределения и для выборки

с использованием критерия Стyдента определялся 95-процентный доверительный интервал. После этого вычислялось среднее значение толщины покрyтия.

Также измерялось время напыления деталей. Поскольку детали в процессе напыления нагреваются, то для предотвращения перегрева выше 250 °С

необходимо прерывать процесс напыления на некоторое время для их дополнительного охлаждения. Поэтому измерялись как непосредственное, так и общее время напыления, включающее в себя межоперационные перерывы для охлаж-

дения.

Количество израсходованного порошка определялось как разность между его массой до и после напыления покрытия.



Рис. 8. Напыляемая деталь и плазматрон, работающий без подачи порошка

**Режимы напыления покрытий**

Эксперименты по напылению проводились при одинаковых режимах работы плазматрона и одинаковых скоростях вращения детали. Расстояние от плазматрона до напыляемой поверхности и скорость перемещения плазматрона вдоль поверхности детали оставались постоянными.

Основные режимы напыления выглядят следующим образом:

сила тока на дуге, А.....220  
 напряжение, В.....210  
 дистанция напыления, мм...150...200

плазмообразующий газ....воздух + пропан  
 давление воздуха, МПа.....0,28

частота пульсаций порошка, пульс./мин.....45

Оба используемых питателя были отрегулированы на максимально возможную подачу порошка. Напыление детали в режиме с обычной и пульсирующей подачей порошка показано на фотографиях (рис. 9).

а)



б)



Рис. 9. Напыление покрытий с пульсирующей (а) и обычной (б) подачей порошкового материала в дуговую плазму

На снимках можно видеть, что запыленный поток плазмы при напылении с подачей порошка в пульсирующем режиме занимает больший объем, чем запыленный поток при обычной (равномерной) подаче порошка. Это может свидетельствовать о том, что при пульсирующей подаче порошок эффективней, чем при равномерной, проникает в поток дуговой плазмы и нагревается в нем.

**Результаты сравнительных исследований процессов напыления покрытий с пульсирующей и обычной подачей порошка**

Напыление детали в пульсирующем режиме велось в два этапа по 480 и 420 с с перерывом на охлаждение между ними в 2100 с (суммарное время напыления – 3000 с). За время напыления израсходова-

но 2,1 кг порошка. Средняя толщина покрытия составила  $0,633 \cdot 10^{-3}$  м.

Напыление детали в режиме с равномерной подачей нагретого порошка велось в четыре этапа со средней длительностью каждого по 540 с с тремя перерывами на охлаждение между ними общим временем 6600 с. Суммарное время напыления составило 8760 с. За время напыления израсходовано 2,55 кг порошкового материала. Средняя толщина покрытия, напыленного с постоянной подачей порошка, составила  $0,528 \cdot 10^{-3}$  м.

Результаты определения скорости нарастания покрытий представлены в табл. 1.

Фотография напыленной детали показана на рис. 10.

Табл. 1. Скорость нарастания плазменных покрытий при напылении с пульсирующей и равномерной подачей порошка

Режим напыления	Время напыления покрытия, с	Толщина покрытия, м	Скорость нарастания покрытия, м/с
Пульсирующая подача порошка	900	$0,633 \cdot 10^{-3}$	$7,033 \cdot 10^{-7}$
Равномерная подача порошка	2160	$0,528 \cdot 10^{-3}$	$2,444 \cdot 10^{-7}$



Рис. 10. Деталь с напыленным керамическим покрытием



На основании результатов проведенных экспериментов можно сделать вывод, что скорость нарастания плазменных покрытий, напыленных в режиме с пульсирующей подачей порошка, в 2,9 раза превышает скорость их нарастания при равномерной подаче порошкового материала, одновременно сокращается и его расход. Это свидетельствует о большей производительности и экономичности разработанной технологии и оборудования для плазменного напыления с пульсирующей подачей труднотекучих порошков по сравнению с обычным способом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с : ил.
2. **Эсибян, Э. М.** Энергетические и технологические особенности воздушно-газового плазменного напыления / Э. М. Эсибян, А. Г. Саков // Автоматическая сварка. – 1989. – № 10. – С. 28–32.
3. **Кудинов, В. В.** Плазменные покрытия / В. В. Кудинов. – М. : Наука, 1977. – 184 с.
4. **Кудинов, В. В.** Нанесение плазмой туго-

плавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М. : Машиностроение, 1981. – 192 с.

5. **Каталымов, А. В.** Дозирование сыпучих и вязких материалов / А. В. Каталымов, В. А. Любартович. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.

6. **Бодяко, М. Н.** Газотермическая обработка керамических оксидов / М. Н. Бодяко, Ф. Б. Вурзель, Е. В. Кремко ; под ред. О. В. Романа. – Минск : Наука и техника, 1988. – 223 с.

7. Газотермическое напыление покрытий : сб. руководящих техн. материалов. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. – 176 с.

8. Газотермическое напыление : учеб. пособие / Под общ. ред. Л. Х. Балдаева. – М. : Маркет ДС, 2007. – 344 с.

9. **Старовойтов, А. М.** Технология напыления плазменных керамических покрытий с пульсирующей подачей труднотранспортируемых порошковых материалов / А. М. Старовойтов, А. С. Федосенко // Сварка и родственные технологии : сб. тр. – Минск, 2007. – С. 91–94.

10. Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : науч.-техн. конф. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., НАН РБ, Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 267 с : ил.

11. **Анциферов, В. А.** Порошковая металлургия и напыленные покрытия : учебник для вузов / В. А. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин. – М. : Металлургия, 1987. – 641 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 08.10.2008

#### **G. F. Lovshenko, A. S. Fedosenko, A. M. Starovoitov Comparative research of plasma coating rate of rise at sputtering in modes with usual and pulsating feed of poorly fluid composite ceramic powder**

On the bases of the research that has been carried out plasma coating rates of rise from poorly fluid composite ceramic powder which is fed in usual continuous mode and pulsating mode in the arc air-and-propane plasma on the nozzle section of the plasmatron have been found.